

氏 名 前田 泰成

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 1681 号

学位授与の日付 平成26年3月20日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 ログステップマルチキャリア波による超音波ドップラーイメージング  
の理論と実装

論文審査委員 主 査 教授 橋爪 宏達  
教授 高須 淳宏  
准教授 後藤田 洋伸  
准教授 小野 順貴  
教授 杉本 雅則 北海道大学

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

本論文は、新たに考案した広帯域信号であるログステップマルチキャリア信号を提案し、その理論的記述を行う。また同波形を用いた 3D ドップラーイメージングと反射体速度推定のための新アルゴリズムを提案し、同アルゴリズムを用いたシミュレーションおよび空中超音波環境における実験結果を示すものである。

本研究の主要成果は、送信波にログステップマルチキャリア波を使い、ドップラーシフトを受けた受信波との間に相互相関信号処理を行うことによって達成される。

空中超音波を用いたイメージングは、暗闇や暗渠など光を発することが困難な状況下での測定、霧やスモッグなどの光非透過環境での測定において、光学的手法を用いたイメージングに対する優位性を持つ。また、光速に対して動体反射体との相対速度比の変化が得られやすい音速の特性を利用し、物体速度を測定できることにも、空中超音波を用いる利点がある。超音波イメージングでは、光学的手法におけるレンズとシャッターの信号処理による代替手段の開発が基本的課題である。この機能を持つ信号処理技法はビームフォーマーとマッチドフィルターとして知られている。

近年 MEMs や cMUTs といった半導体技術を応用して製造された広帯域の超音波を送受信できる素子が注目を集めている。本研究ではイメージングのために、これらの素子の利用を想定し広帯域信号の信号処理を行う方法論を扱う。広帯域信号として従来からよく用いられてきたものにチャープ信号が挙げられるが、最近では通信分野で多用される直交周波数多重化方式 (OFDM) で用いられる信号を用いる方法が考案された。OFDM 信号はキャリア周波数が等間隔で並んだ信号であるため、等ステップマルチキャリア信号と呼ぶ。

ドップラー効果は反射波の周波数に対して乗法的に作用することに注目する。等ステップマルチキャリア波は、ドップラー効果により等間隔で並んだキャリアは高周波数ほど間隔の広いスペクトル分布を持つようになる。このことにより各キャリアの直交性が失われるばかりでなく、マッチドフィルターの演算における同一波形の検出性能が損なわれる。このため広範囲のドップラー量の測定には、想定されるドップラーシフト範囲に対応した多大な数の相関演算を必要とする。

この欠点を改善するのが、ログステップマルチキャリア信号である。ログステップマルチキャリア信号は、キャリアの対数間隔が等しくなるように配置されているため隣接キャリアの比はドップラー不変性を保有する。また同時にログステップマルチキャリア信号のマッチドフィルター感応性のドップラーシフトによる変化によりドップラー量の微細変化の検知能力を高める。

本論文では、ログステップマルチキャリア波の各キャリア初期位相に整列位相の設定を施した場合において、この波が他の広帯域信号に見られない良い性質を持つことを示す。ログステップマルチキャリア波のこの性質を用いたドップラーイメージング及びドップラー速度推定のためのアルゴリズムの提案を行う。

この速度推定アルゴリズムは、従来医用超音波で循環器系の血流検査のために用いられて

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

きたカラードップラー法に対して、検出可能な推定域が広く、推定精度においても約 20 倍の性能を持つことが、シミュレーションにより示される。

本論文は次の構成をとる。

最初に第 1 章で、本研究の大きなテーマである広帯域の連続波を用いた音響イメージングについて紹介し、位置と速度の同時推定を行うドップラーイメージングの研究背景について解説する。ここでは、研究の概要について記述する。本研究で参考にした先行研究を、空中超音波のみならず、医用超音波、非破壊検査、合成開口レーダー等の関連分野を参照しながら紹介する。

第 2 章では、ドップラーイメージングに用いられる各種手法について、その基礎となる技術を中心に定式化を行う。特に超音波を用いた 3D イメージングと到来角、到来時間推定を可能にする基礎技術についての検討を行う。本研究で用いるビームフォーマー、マッチドフィルター、3D イメージングおよびドップラー速度推定についての基礎概念を説明する。この章ではまた、医用超音波で用いられる各種イメージング手法の紹介を行う。特に本稿で比較検討の対象としたカラードップラー法について詳しく解説する。加えて同手法においてドップラー推定を行うために考案した包絡線位相からドップラー速度を再構成する方法について述べる。

第 3 章では、提案手法で用いるログステップマルチキャリア信号について定義を行い、その各種理論的性質について証明を行う。また同信号について他の広帯域信号と比較しながら解明を行う。本研究の主要概念である、(1) ドップラー相互相関関数の持つ到来時刻の系統偏移および (2) 相互相関プロファイルの微細構造について、その理論的性質について解明する。

第 4 章では、これらを利用した 3D イメージングについて定式化し計算アルゴリズムを構築する。また実際にイメージング実験を行った結果を紹介する。

第 5 章では、既存手法及び提案手法を用いたドップラー推定精度についての比較を、シミュレーションにより実施する。

第 6 章では、提案手法の耐ノイズ性を改善する方法として、ログステップマルチキャリア波特有の性質を用いた速度推定手法の改善方法についての提案を行う。また同手法についてシミュレーションにより有用性を検討する。

第 7 章では、提案手法による実験を行うために製作した超音波イメージング装置についての紹介を行う。特に多チャンネルからの高速同時入力を可能にする回路技術について、本研究で行った発案と工夫に重点を置きながら、当該分野で必要とされる超音波アレイ受信装置について解説する。

最後に第 8 章において、本論文の総括を行うと同時に、研究の今後の展開について述べる。

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

(論文審査結果) [ 2014 年 1 月 17 日実施]

前田君の研究は、広くは音響イメージングと呼ばれる分野のもので、超音波を送信し、検出対象からの反射波をマイクロフォンアレイで受信することで、検出対象の空間分布像を得る（イメージング）とともに、その物体の距離方向の速度を同時に測定する手法について、新しい波形および信号処理アルゴリズムの提案を行うものである。音響（超音波含む）ドップラーイメージングの例として、海中の深層海流の計測や医療の超音波診断装置（超音波エコー）などがある。後者は特に日常生活に直結するものであり、非侵襲で体内の組織や臓器の画像を得られるほか、ドップラー効果を利用して像内の血流の様子を観察できる。この論文は上記のような应用到用できる新波形、新信号処理アルゴリズムを提案するもので、特に速度検出性能、悪環境（高ノイズ環境）下でのイメージング性能を改良していると主張している。本論文は全 8 章からなる。

第 1 章「序論」で上記の研究背景を説明し、第 2 章「ドップラーイメージング」において音響イメージングの基礎技法となるビームフォーミングやマッチドフィルタなどの信号処理原理を述べる。特に信号波の振幅と位相の扱いを簡便にするため、それを複素数を用いた解析信号に変換する手法であるヒルベルト変換について説明している。従来技法として、医療超音波エコー装置におけるカラードップラー法についてアルゴリズムを詳述している。

第 3 章「ログステップマルチキャリア波」で、本論文の着想の中心となる波形を導入する。これは複数周波数からなるマルチキャリア波の一種だが、要素周波数の間隔を等間隔でなく指数関数間隔にとったもの（ログすなわち対数スケールで表記すると等間隔となるためこう命名）で、著者のオリジナルである。動物体から反射され、ドップラーシフトで周波数が変化しても、マルチキャリアの相互の周波数比は同様に保たれる利点をもつ。

第 4 章「ログステップマルチキャリア波を用いたドップラーイメージング」、第 5 章「ログステップマルチキャリア波を用いたドップラー速度推定」で、この波形を使用してイメージングする際の信号処理アルゴリズムを記載している。空中超音波を使い実験装置を構成し、実際に動物体についてイメージングを行い、従来のカラードップラーアルゴリズムと性能比較をしている。あわせてシミュレーションによりその性能の裏づけをし、従来手法に比べ速度検出精度で約 20 倍の性能向上を達成したと報告している。

このアルゴリズムは速度検出性能では従来のを大きく改善するが、一方で動いている物体の位置を少し誤って検出してしまう欠点をもつ。それを改善する手法として、信号波を時間軸で反転させたものと結合し使用して、位置検出の誤差を除去する手法を着想した。それを第 6 章「対称ログステップマルチキャリア波を用いた速度推定法の改善」で記載する。この波形には劣悪な SNR 状況下でも良好なイメージングを達成できるという効果ももつ。

第 7 章「超音波イメージング装置」でこのアルゴリズムをイメージング装置として実装する場合の構成例（実際に試験に使用したもの）を述べる。第 8 章「結語」にて、本手法を用いることで期待できる応用分野や今後の研究の展望を述べる。

(Separate Form 3)

超音波ドップラーイメージングは医療やロボット誘導、車両の安全航行などの分野に広く応用の期待できるもので、本論文で述べられた手法はその速度検出精度改善と劣悪な SNR 環境での性能向上をもたすもので、日常生活に直結する応用をもつ、価値のある成果と考える。この研究内容は査読つきジャーナル論文として発表済みであり、また 4 件の査読つき国際会議論文、4 件の国内学会発表となっている。知的所有権として、この論文の着想にもとづく国内特許申請も 1 件ある。

以上に基づき審査した結果、5 名の審査委員全員一致で、本学位請求論文は学位を授与するのに十分なレベルであるものと判定された